

# АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА НАГРЕВА МЕТАЛЛА ДЛЯ АСУ НА ПРИМЕРЕ ТОЛКАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ СТАНА 2800 ОАО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

© Е.В. Попов, 2012

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург*

© Г.М. Дружинин, 2012

*ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт  
металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»), г. Екатеринбург*

Снижение энергозатрат и повышение качества нагрева металла напрямую связано с наличием и эффективностью автоматических систем управления тепловой работой агрегата. В настоящее время все больше внимания уделяется методам автоматического управления, сопряженным с быстродействующими (1–2 мин.) математическими моделями, работающими в режиме реального времени.

На данный момент существует множество различных математических моделей, которые позволяют производить расчеты нагрева металла в методических печах, но неспособные к моделированию процесса в режиме реального времени по различным причинам (сложность системы расчетов, большое количество исходных данных, необходимых для получения результатов и т.д.).

В связи с этим была поставлена задача создания быстродействующей математической модели расчета нагрева металла в методической печи для АСУ в режиме реального времени [1]. Наличие такой модели позволяет реализовать автоматическое управление процессом нагрева с определением температурного поля в сечении заготовок при их транспортировке по печи. Последнее дает возможность оценивать тепловое состояние металла не только на выходе из печи, но и в течение всего времени нагрева, особенно при переходных режимах и остановках стана. Помимо этого, данная модель позволяет проводить расчеты нагрева металла в печи, связанные с возможными изменениями производительности, сортамента металла и темпа выдачи заготовок. Для решения задач данного типа использовался метод конечных разностей [2, 3].

Были произведены расчеты нагрева слябов в методической толкательной печи стана 2800 ОАО «Уральская сталь» в том числе и с учетом возможного увеличения ее производительности. При расчетах были использованы экспериментальные данные [4].

В четырехзонных толкательных печах стана 2800 ОХМК (рис. 1) нагревают слябы длиной 1280–2600 мм и толщиной 130–180 мм из углеродистых и низкоуглеродистых сталей до температуры 1240–1250 °С при холодном посаде. Печи оборудованы керамическими рекуператорами, обеспечивающими нагрев воздуха до температуры 550 °С, и инжекционными горелками типа П, работающими на смеси природного и доменного газов с теплотой сгорания 6700 кДж/м<sup>3</sup>. Горение сосредоточено вблизи горелочного торца зон отопления.

Размеры полезного пода печей 30,27×6,15 м. Средний коэффициент заполнения печи металлом составляет 0,64. Проектная система автоматического регулирования теплового режима печей состоит из четырех автономных систем регулирования температуры по зонам и давления в печи.

Результаты экспериментальных исследований нагрева заготовок углеродистой стали в печи представлены на рис. 2, где показано изменение температуры опытного сляба толщиной 150 мм в сечении, находящемся между глиссажными трубами.

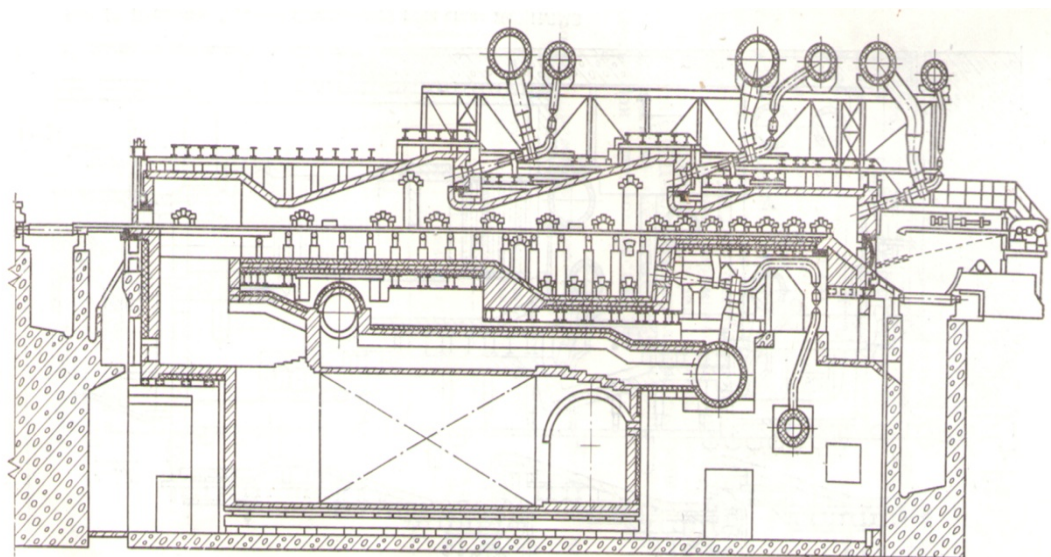


Рис. 1. Продольный разрез методической печи стана 2800 ОАО «Уральская сталь»

Для описания процесса нагрева заготовки толкательная печь была условно разделена на четыре участка:

- I – методическая зона (верх и низ);
- II – первая сварочная зона (верх и низ);
- III – вторая сварочная зона (верх и низ);
- IV – томильная зона (верх).

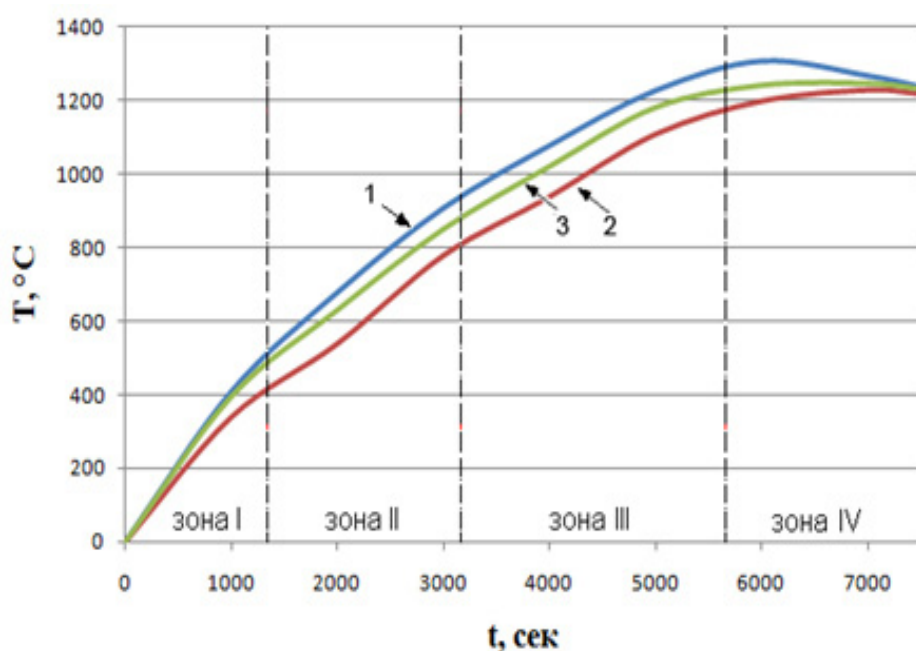


Рис. 2. Изменение температуры опытного сляба в сечении, находящемся между глиссажными трубами в печи в трех точках:  
1 – верхняя поверхность сляба; 2 – нижняя поверхность сляба; 3 – центр сляба

Данному опыту соответствуют следующие режимные параметры работы толкательной печи.  
Общий расход топлива – 29,5 тыс.м<sup>3</sup>/ч.  
Производительность – 55 т/ч.

Температуры продуктов сгорания по зонам:

$T_{II}^B = 1290^\circ\text{C}$ ;  $T_{III}^B = 1340^\circ\text{C}$ ;  $T_{III}^H = 1250^\circ\text{C}$ ;  $T_{IV} = 1300^\circ\text{C}$ .

При заданных температурах продуктов сгорания по зонам коэффициенты теплоотдачи от продуктов сгорания к металлу были рассчитаны при следующих степенях черноты газа:

– Верхние зоны печи:

$\varepsilon_I^B = 0,32$ ;  $\varepsilon_{II}^B = 0,30$ ;  $\varepsilon_{III}^B = 0,28$ ;  $\varepsilon_{IV}^B = 0,29$ ;

– Нижняя зона печи:

$\varepsilon_I^H = 0,33$ ;  $\varepsilon_{II}^H = 0,32$ ;  $\varepsilon_{III}^H = 0,30$ .

Степень черноты металла принималась равной 0,8.

1) Коэффициенты теплоотдачи конвекцией:

$\alpha_I = 12 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ ;  $\alpha_{II} = 11 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ ;  $\alpha_{III} = 11,5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ ;  $\alpha_{IV} = 11,5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ .

2) Коэффициенты теплоотдачи излучением в верхних зонах печи:

$c_I^B = 3,25 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ ;  $c_{II}^B = 3,18 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ ;

$c_{III}^B = 3,12 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ ;  $c_{IV}^B = 3,08 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ .

3) Коэффициенты теплоотдачи излучением в нижней зоне печи:

$c_{II}^H = 3,35 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ ;  $c_{III}^H = 3,18 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ .

С использованием экспериментальных данных были произведены с помощью модели расчеты нагрева заготовки при прохождении ее по печи. При этом учитывались скачкообразные изменения теплофизических величин, таких как теплоемкость и теплопроводность металла, связанные с фазовыми превращениями во время нагрева.

Для учета скачкообразного изменения теплоемкости при построении модели нагрева использовалась формула [5]:

$$c(T) = c_0 + \sum \frac{m_i L_i}{\Delta T_i} \exp[-a_i^2 (\frac{T_{i0} - T}{T_{i0} - T_{i1}})] \quad (1)$$

где  $T_i$  и  $T_0$  – температуры начала и окончания фазовых превращений соответственно,  $^\circ\text{K}$ ;

$c_0$  – теплоемкость стали при отсутствии фазовых превращений,  $\text{Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$L_i$  – теплота эвтектоидного превращения,  $\text{Дж/кг}$ ;

$m_i$ ,  $a_i$  – константы, зависящие от функции ошибок;

$T$  – текущая температура в рассматриваемых точках,  $^\circ\text{K}$ .

Коэффициент теплопроводности учитывался в соответствии с формулами [5]:

$$\lambda(T) = (\lambda_0 - \lambda_1) \{ [1 - \sin^3(K_L \theta_1)] + \lambda_1 \}, \text{ при } T < T_{m1}$$

$$\lambda(T) = (\lambda_2 - \lambda_1) \{ [1 - \exp(-5 \cdot \theta_2^2)] + \lambda_1 \}, \text{ при } T \geq T_{m1}, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$  – максимальное и минимальное значения теплопроводности стали, соответственно,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;

$T_{m1}$  – температура экстремального значения теплопроводности,  $^\circ\text{K}$ ;

$$\theta_1 = \frac{T - T_{m0}}{T_{m1} - T_{m0}} \quad \text{и} \quad \theta_2 = \frac{T - T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}}.$$

С учетом вышеизложенного был смоделирован процесс нагрева углеродистой стали.

Результаты расчета представлены на рис. 3, где показаны температуры заготовки в трех точках:

$T_B$  – на расстоянии 17,5 мм от верхней поверхности сляба;

$T_C$  – в центре сляба;

$T_H$  – на расстоянии 17,5 мм от нижней поверхности сляба;

$\Gamma_B$  – температура продуктов сгорания в верхних зонах печи;

$\Gamma_H$  – температура продуктов сгорания в нижней зоне печи.

Сравнение полученных результатов с опытными данными показывают достаточно высокую степень адекватности разработанной модели экспериментальным данным, полученным на промышленной печи. Лишь в начале первой сварочной зоны разница между

экспериментальными и расчетными данными достигает 40 °С. В дальнейшем эта разница не превышает 10–15 °С. На выходе из печи температура сляба составляет 1240–1250 °С, что соответствует экспериментальным данным и требованиям по нагреву заготовок в данной печи.

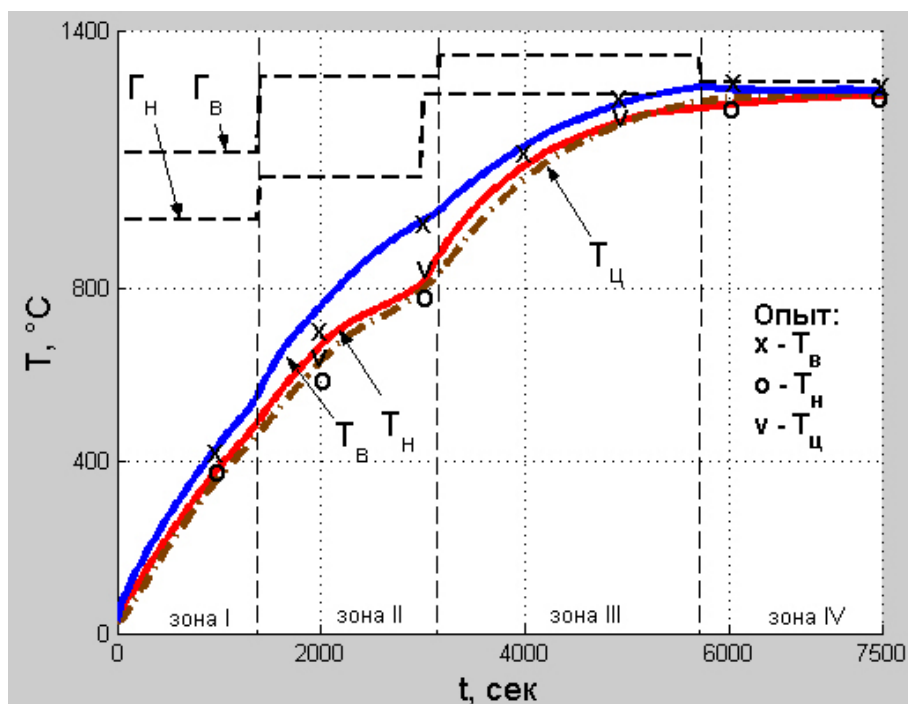


Рис. 3. Температура сляба углеродистой стали при нагреве в методической печи стана 2800

Кроме того, с использованием данной модели были рассчитаны необходимые температуры продуктов сгорания, при которых возможно повышение производительности печи на 25 % (сокращение времени нагрева) при необходимой температуре металла по сечению на выходе из печи 1240–1250 °С:

– температуры продуктов сгорания в верхних зонах печи:

$$T_I^B = 1220 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{II}^B = 1343 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{III}^B = 1380 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{IV}^B = 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

– температуры продуктов сгорания в нижних зонах печи:

$$T_I^H = 1010 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{II}^H = 1110 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{III}^H = 1320 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Зависимость температуры сляба при прохождении его по печи при повышенной производительности показана на рис. 4.

Из данной зависимости видно, что, несмотря на более интенсивный нагрев металла, перепад температур по его сечению в первой сварочной зоне, также как и в базовом варианте нагрева заготовки, не превышает 200 °С. В дальнейшем идет постепенное выравнивание температур, а температура металла на выходе из печи также составляет 1240–1250 °С.

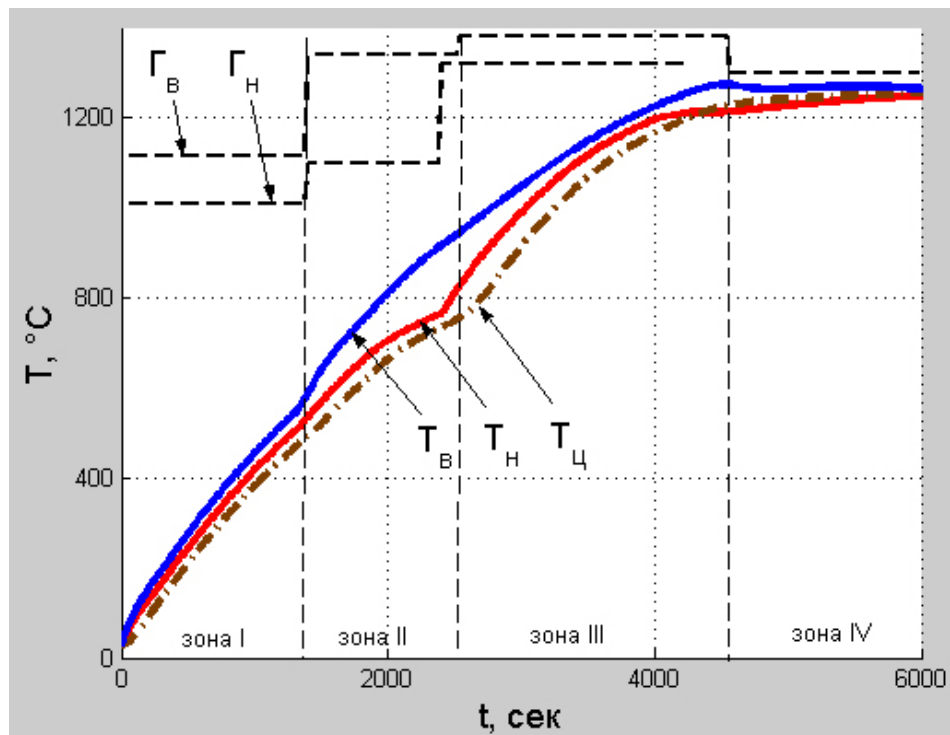


Рис. 4. Температура слэба углеродистой стали при нагреве в методической печи стана 2800 при повышении производительности на 25 %

Для наглядного сравнения температур нижней и верхней поверхностей слэба при различных режимных характеристиках печи на рис. 5 показаны зависимости температуры заготовки при двух режимах по производительности.

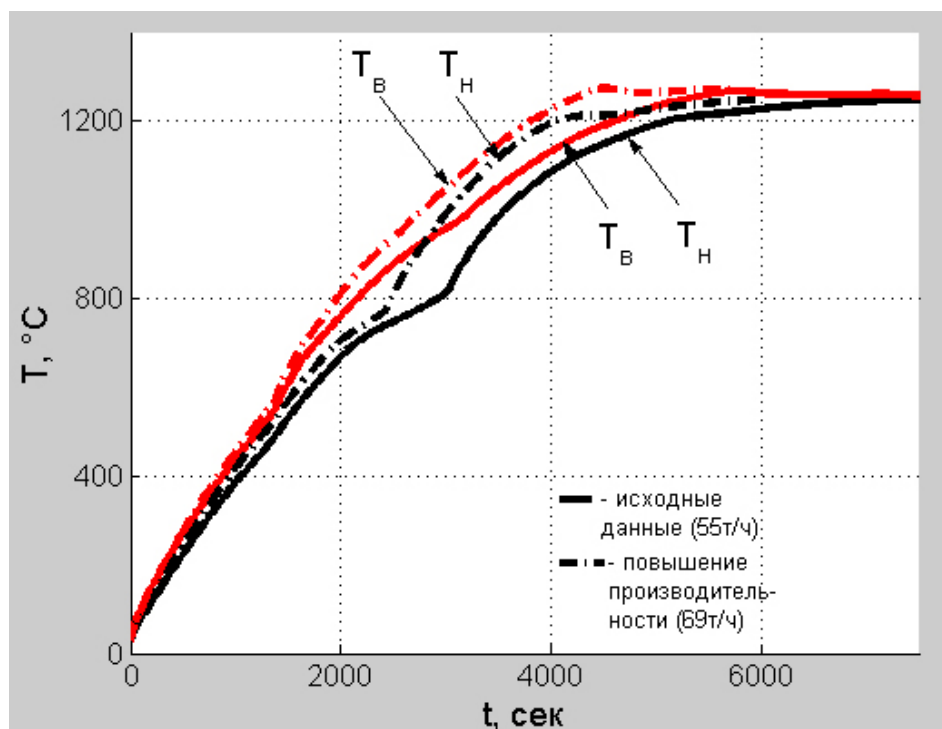


Рис. 5. Температуры слэба углеродистой стали при нагреве в методической печи стана 2800 при различной производительности

## Список использованных источников

1. Попов Е.В., Дружинин Г.М. Влияние теплофизических свойств стали на нагрев заготовок в печах // Известия вузов «Черная металлургия». 2012. № 1.
2. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972. 415 с.
3. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 553 с.
4. Хилков Б.М., Оркин В.М. Разработка и промышленная проверка мероприятий по улучшению конструкции и оптимизации теплового режима методических печей листопрокатного цеха ОХМК : отчет. Свердловск: ВНИИМТ, 1969. 85 с.
5. Тимошпольский В.И. Самойлович Ю.А. Теоретические основы обработки стали в трубопрокатном производстве. Минск: Белорусская книга, 2005. 303 с.
6. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г., Гусовский В.Л., Калинова Т.В. Горелочные устройства промышленных печей и топок. М.: Интермет Инжиниринг, 1999. 560 с.

## КАЧЕСТВО ЖИДКОЙ МЕДИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕДНОЙ КАТАНКИ

© О.В. Порох, Г.В. Воронов, 2012

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург*

Медная катанка предназначена для производства электротехнических изделий и в основном выпускается методом непрерывного литья и прокатки из катодной меди марки М00к по ГОСТ 546-88. Медная катанка является одним из главных составляющих в последующем производстве кабельной продукции.

Процесс производства медной катанки является высокотехнологичным и требует использования высокоточного оборудования для поддержания требуемого качества производимой продукции.

Существует две основные технологии производства медной катанки: «Contirod», принадлежащая немецкой компании «SMS Meer» (холдинг «SMS Group»), и «Southwire», принадлежащая американской компании «Southwire Company». В нашей стране представлены обе эти технологии.

На предприятии ОАО «Уралэлектромедь» применяется технология «Contirod», на заводах ЗАО «Русская медная компания» установлена линия «Southwire».

Также существует технология производства медной катанки из медного лома с применением огневого рафинирования меди. Данная технология, называемаяся «La Farga Lacambra» и принадлежащая одноименной испанской компании, применяется на предприятии ЗАО «Каменская катанка».

В данной работе рассматривается технология «Contirod» с использованием природного газа в качестве источника тепловой энергии (в качестве источника тепловой энергии технология «Contirod» допускает использование как электроэнергии, так и природного газа).

Особенностью использования природного газа является необходимость учитывать состав и дымовых газов, соприкасающихся с поверхностью жидкой меди, и аэродинамические потоки, которые определяют характер теплообмена между газовой средой и поверхностью расплава меди.

Рассматриваемая технологическая схема производства медной катанки включает в себя шахтную печь для плавки катодов, промежуточный желоб, печь-миксер, разливочный желоб, кристаллизатор и прокатный стан.